



УДК 621 .03

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Амиров С.Ф, Якубов М.С, Тураев У.Р
Ташкентский Государственный Транспортный
Университет

Аннотация. В статье рассматриваются современные цифровые технологии контроля и диагностики технического состояния электромагнитных цепей тяговых подстанций железных дорог. Особое внимание уделено применению систем автоматизированного управления, интеллектуальных датчиков, технологий промышленного интернета вещей и методов искусственного интеллекта. Проведен анализ эффективности внедрения цифровых решений в части повышения надёжности, снижения эксплуатационных затрат и предотвращения аварийных режимов работы оборудования.

Ключевые слова; тяговая подстанция, электромагнитные цепи, диагностика, мониторинг, надёжность, SCADA, IoT, искусственный интеллект, релейная защита.

Abstract. The article examines modern digital technologies for monitoring and diagnosing the technical condition of electromagnetic circuits of railway traction substations. Special attention is given to the application of automated control systems, intelligent sensors, Industrial Internet of Things technologies, and artificial intelligence methods. An analysis is carried out of the effectiveness of implementing digital solutions in terms of improving reliability, reducing operating costs, and preventing emergency operating modes of equipment.

Keywords: traction substation, electromagnetic circuits, diagnosis, monitoring, reliability, SCADA, IoT, artificial intelligence, relay protection.

Введение

Современная железнодорожная инфраструктура предъявляет повышенные требования к надежности систем электроснабжения. Тяговые подстанции являются ключевыми элементами энергоснабжения электрического подвижного состава.[1] Их устойчивое функционирование во многом определяется техническим состоянием электромагнитных цепей, включающих силовые трансформаторы, реакторы, выпрямительные агрегаты и устройства релейной защиты.[2]

Традиционные методы периодического контроля постепенно уступают место непрерывному цифровому мониторингу.[7] Внедрение интеллектуальных технологий позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания к концепции предиктивной диагностики, что и является актуальной задачей и необходимостью системы мониторинга применением диагностических методов и технических средств.[3]

Основной част

Измерительные цепи и их модернизация для оценки технического состояния оборудования

Понятие измерительных цепей. Измерительные цепи — это совокупность устройств, обеспечивающих преобразование физических параметров (ток, напряжение, температура, вибрация и др.) в измеряемый и анализируемый сигнал. В энергетике и на тяговых подстанциях измерительные цепи используются для контроля токов и напряжений, оценки загрузки оборудования, диагностики трансформаторов и реакторов, анализа аварийных режимов, контроля качества электроэнергии.[7]

Основные параметры оценки технического состояния. Измерительные цепи контролируют Ток I (А), Напряжение U (В), Активную и реактивную мощность P, Q (Вт, вар), Температуру T (°C), Сопротивление изоляции (МОм), Частоту f (Гц), Гармоники (%).

Традиционные измерительные схемы имеют ряд недостатков, таких как подверженность шумам аналоговых сигналов, ограниченная точность, отсутствие онлайн-анализа, большое количество кабельных линий, а также необходимость ручной обработки данных.

Переход на цифровые измерительные трансформаторы. Вместо традиционных ТТ и ТН используются оптические и электронные датчики. Они обеспечивают Высокая, Гальваническая развязка, Устойчивость к помехам, Передача данных по оптоволокну.

Интеллектуальные датчики обладают такими характеристиками, как встроенная самодиагностика, передача данных через промышленные протоколы, а также возможность удалённой калибровки.[7] Внедрение стандартов МЭК 61850 обеспечивает передачу цифровых данных, сокращение использования медных кабелей, а также возможность высокоскоростного обмена информацией.

Интеграция с SCADA и системами аналитики. Современные измерительные цепи подключаются к системам мониторинга, базам данных, системам предиктивной диагностики.[7]

Использование IoT-технологий позволяет организовать распределённый мониторинг, подключать удалённые объекты, выполнять анализ в облаке.[6][10]

Роль модернизации в оценке технического состояния

После модернизации становится возможным раннее выявление дефектов, прогнозирование отказов, переход к ремонту по состоянию, снижение аварийности, повышение надёжности энергосистемы.

Практический эффект

Модернизация измерительных цепей обеспечивает повышение точности измерений до 0,2–0,5%, сокращение времени реакции на аварии, снижение эксплуатационных затрат, продление срока службы оборудования.

Современные измерительные цепи являются основой цифровой диагностики энергетического оборудования.[7] Их модернизация — ключевой этап перехода к интеллектуальным подстанциям и системам предиктивного обслуживания.



Измерительные цепи и улучшение их метрологических характеристик

1. Понятие измерительных цепей

Измерительная цепь — это совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, обеспечивающих преобразование контролируемой физической величины (ток, напряжение, температура и др.) в форму, пригодную для отображения, регистрации или передачи.

Типовая структура:

Датчик → преобразователь → измерительный трансформатор → АЦП → контроллер → система обработки

Основные метрологические характеристики

Метрологические характеристики определяют точность и достоверность измерений.

Погрешность измерения (Δ)

$$\Delta = X_{\text{изм}} - X_{\text{ист}} \quad (1)$$

$X_{\text{изм}}$ — измеренное значение, $X_{\text{ист}}$ — истинное значение.

Единица измерения — та же, что у измеряемой величины (А, В, °С и т.д.).

Относительная погрешность (δ)

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{ист}}} \times 100\% \quad (2)$$

Измеряется в процентах (%).

Класс точности

Определяет допустимую основную погрешность прибора (например, 0,2; 0,5; 1,0).

Для трансформаторов тока и напряжения:

0.2 — высокоточные измерения; 0.5 — коммерческий учёт; 5Р, 10Р — для защиты.

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (3)$$

Чувствительность (S) показывает изменение выходного сигнала при изменении входного.

Разрешающая способность минимальное изменение измеряемой величины, которое фиксируется прибором.

Повторяемость и воспроизводимость характеризуют стабильность результатов при повторных измерениях.

Динамическая погрешность возникает при измерении быстро изменяющихся процессов (переходные режимы).

Факторы, влияющие на метрологические характеристики, как температурные изменения, электромагнитные помехи, старение элементов, нелинейность датчиков, нестабильность питания, качество калибровки.

Пути улучшения метрологических характеристик. Переход на цифровые измерительные трансформаторы преимущества: снижение фазовой погрешности, высокая линейность, отсутствие магнитного насыщения (для оптических датчиков).

Использование высокоточных АЦП. Повышение разрядности позволяет уменьшить квантовую погрешность и повысить разрешающую способность.

Температурная компенсация. Применение: датчиков температуры; алгоритмической коррекции; термостабилизации.

Экранирование и фильтрация сигналов. Применение экранированных кабелей; цифровая фильтрация; оптоволоконные линии связи.

Калибровка и поверка. Регулярная метрологическая поверка снижает систематическую погрешность, обеспечивает соответствие стандартам.

Внедрение цифровых стандартов. Применение протоколов передачи данных (например, МЭК 61850) уменьшает влияние аналоговых искажений и повышает точность передачи.

Современные направления развития. Интеллектуальные датчики с самодиагностикой, онлайн-контроль метрологических параметров, автоматическая коррекция ошибок, интеграция с системами предиктивной диагностики, применение алгоритмов машинного обучения для компенсации погрешностей.

Практический эффект улучшений. Улучшение метрологических характеристик позволяет повысить точность учёта электроэнергии, корректно анализировать переходные процессы, точнее настраивать релейную защиту, снизить аварийность, увеличить надёжность энергосистемы.[5]

Математические модели электромагнитных цепей (с расшифровкой параметров и единицами измерения)

Электромагнитные цепи описываются дифференциальными уравнениями, полученными из законов Кирхгофа и закона электромагнитной индукции.[8] Основными переменными являются ток, напряжение, магнитный поток и индуктивность.

Основные единицы СИ: Ток — ампер (А), Напряжение — вольт (В), Сопротивление — ом (Ω), Индуктивность — генри (Гн), Ёмкость — фарад (Ф), Магнитный поток — вебер (Вб), Время — секунда (с), Частота — герц (Гц)

RL-цепь (цепь первого порядка)

Дифференциальное уравнение:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = U(t) \quad (4)$$

Где L — индуктивность, Гн (H), R — активное сопротивление, Ом (Ω), $i(t)$ — ток, А, $U(t)$ — напряжение источника, В, t — время, с

Постоянная времени:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (5)$$

τ — постоянная времени, с

RLC-цепь (второй порядок)

Дифференциальное уравнение:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0 \quad (6)$$

Где L — индуктивность, Гн, R — сопротивление, Ω , C — ёмкость, Ф (F), $i(t)$ — ток, А

Параметры переходного процесса:

Коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (7)$$

α — коэффициент затухания, 1/с

Собственная угловая частота:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8)$$

ω_o — рад/с

$$\text{Затухающая частота : } \omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - \alpha^2} \quad (9)$$

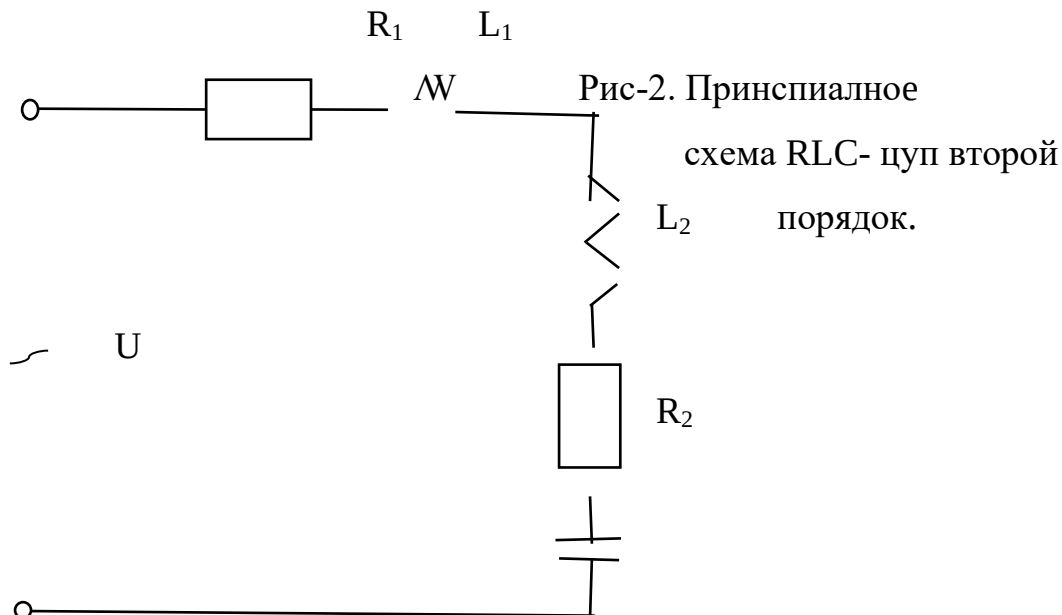
ω_d — рад/с

Модель трансформатора

Система уравнений:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (10)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (11)$$



Где u_1, u_2 — напряжения обмоток, В; i_1, i_2 — токи обмоток, А; R_1, R_2 — сопротивления обмоток, Ω ; L_1, L_2 — индуктивности обмоток, Гн; M — взаимная индуктивность, Гн.

Коэффициент связи:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (12)$$

k — безразмерная величина (0–1)

Магнитная цепи

Закон магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{F}{R} \quad (13)$$

Где, Φ — магнитный поток, Вб (Wb); F — магнитодвижущая сила, А;
 R — магнитное сопротивление, А/Вб.

МДС

$$F = N i \quad (14)$$

N — число витков (безразмерно), i — ток, А

Магнитное сопротивление:

$$R = \frac{l}{\mu S} \quad (15)$$

l — длина магнитопровода, м; μ — магнитная проницаемость, Гн/м;

S — площадь сечения, м².

Ток короткого замыкания

$$I(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) + I_{an} e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (16)$$

Где I_m — амплитуда периодической составляющей, А; ω — угловая частота, рад/с; φ — начальная фаза, рад; I_{an} — амплитуда аperiodической составляющей, А; I_{an} — амплитуда аperiodической составляющей, А; τ — постоянная времени, с

Модель в пространстве состояний

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (17)$$

$$y = Cx + Du \quad (18)$$

Где x — вектор состояния (токи, потоки), А или Вб; u — входной сигнал (напряжение), В; y — выходной сигнал (ток/напряжение), А или В; A — матрица системы, 1/с; B — матрица управления; C , D — матрицы выхода.

Нелинейная модель магнитопровода

$$B = \mu(H) H \text{ или } \Phi = f(i)$$

(19, 20)

Где B — магнитная индукция, Тл (Т); H — напряженность магнитного поля, А/м; $\mu(H)$ — магнитная проницаемость, Гн/м.

Математические модели электромагнитных цепей позволяют количественно описывать переходные процессы, рассчитывать токи короткого замыкания, анализировать коммутационные режимы и выбирать параметры защиты.

Особенно важны модели второго порядка и нелинейные модели при анализе трансформаторов и тяговых подстанций железных дорог.

SCADA: краткие функциональные особенности и направления модернизации



Направления модернизации SCADA

1. Переход к распределённой архитектуре

Использование облачных и гибридных решений.

2. Интеграция с IIoT (Industrial IoT)

Подключение интеллектуальных датчиков и беспроводных устройств.

3. Внедрение искусственного интеллекта

Прогнозирование отказов и предиктивная диагностика.

4. Кибербезопасность

Шифрование данных, многоуровневая аутентификация, защита от кибератак.

5. Web-интерфейсы и мобильный доступ

Удалённый контроль через защищённые каналы связи.

6. Big Data и расширенная аналитика

Обработка больших массивов данных для оптимизации режимов работы.

7. Переход к концепции Digital Substation[9]

Полная цифровизация измерений и управления.

SCADA является основой автоматизированного управления энергетическими объектами.[4] Модернизация системы направлена на повышение надёжности, безопасности, гибкости управления и переход к интеллектуальным цифровым подстанциям.

Общий вывод

Математические модели электромагнитных цепей играют важную роль в анализе работы электрических систем. С их помощью можно описывать процессы изменения токов, напряжений и магнитных потоков во времени, а также исследовать режимы работы электрических устройств. Особое значение имеет анализ переходных процессов, которые возникают при включении и отключении цепей, коротких замыканиях и резких изменениях нагрузки.

Измерительные цепи обеспечивают получение информации о состоянии электрооборудования и позволяют контролировать основные параметры системы. Точность таких измерений определяется метрологическими характеристиками, такими как погрешность, чувствительность и стабильность.

Модернизация измерительных систем и внедрение современных автоматизированных технологий, включая SCADA, значительно повышают эффективность контроля и управления энергетическими объектами. Это позволяет своевременно выявлять неисправности, повышать надёжность оборудования и обеспечивать стабильную работу электроэнергетических систем.

Список использования литературы

1. Электроснабжение железных дорог — В. А. Кудряшов
2. Тяговые подстанции железных дорог — Ю. М. Иньков
3. Цифровые подстанции — А. В. Захаров
4. SCADA-системы в энергетике — В. В. Сергеев
5. Релейная защита и автоматика энергосистем В. А. Андреев
6. Интеллектуальные электрические сети — Н. И. Воропай
7. Диагностика электрооборудования подстанций — А. Г. Михайлов
8. Электромагнитные процессы в электроэнергетических системах
Л. А. Жуков
9. Цифровые технологии в электроэнергетике — Д. А. Арзамасцев
10. Автоматизация тяговых подстанций — Е. Н. Розанов